

В.Ю. Долматов¹, д-р техн. наук, **Г.К. Буркат²**, канд. хим. наук, **К.А. Свирь²**, инж.,
В.А. Марчуков¹, канд. хим. наук, **А.О. Дорохов³**, инж., **А. Веханен⁴**, PhD,
В. Мюллюмаки⁴, PhD, **А.С. Козлов¹**, канд. хим. наук, **Н.С. Алмазова¹**, инж.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», Советский пр., д. 33-а, 192076, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: diamondcentre@mail.ru

²Санкт-Петербургский Государственный технологический институт (Технический университет), Московский пр., д. 26, 190013, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: office@technolog.edu.ru

³АО «Завод Пластмасс», пос. Советов, 456604, г. Конейск, Челябинская обл., Россия, e-mail: info@zavod-plastmass.ru

⁴«Carbodeon Ltd. Оу», Pakkalankuja 5, 015105, Ваанта, Финляндия, e-mail: asko.vehanen@carbodeon.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ХРОМА В ПРИСУТСТВИИ КОМПОЗИЦИОННОГО АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СОСТАВА

Цель исследования состоит в разработке способа получения качественного электрохимического хромового покрытия с использованием нового вида алмазосодержащей добавки, имеющей существенные преимущества перед традиционно используемыми детонационными наноалмазами (ДНА) в виде водных суспензий. В качестве добавки разработали и использовали порошкообразный композиционный алмазосодержащий состав, состоящий из детонационного наноалмаза (ДНА), полученного подрывом зарядов из тетрила, щелочного (NaHCO_3) и кислотного агента (лимонная кислота). Состав содержит 62,5 % мас. ДНА. Использовали стандартный электролит хромирования: CrO_3 – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л, ДНА – от 0,1 до 5 г/л, традиционные методологии и алгоритм проведения эксперимента. Рамки исследования ограничиваются созданием и применением конкретного, удобного в работе и приготовлении состава с ДНА. Модифицированный ДНА (МДНА) можно добавлять в стандартный электролит хромирования непосредственно или в виде свежеприготовленной водной суспензии, он экологически безопасен. Достигнуто существенное увеличение выхода хрома по току на ~5 %.

Оригинальность работы заключается в совмещении в алмазосодержащем составе «инертного» наноалмаза и активных щелочного и кислого компонентов, срабатывающих только при внесении в водную среду и обеспечивающих необходимую дезагрегацию и устойчивость суспензий ДНА. Достигнуто увеличение микротвердости износостойкого хромового покрытия в 1,3 раза (до 9,6 ГПа) и твердого хромового покрытия в 1,6 раза (до 13,6 ГПа). Износостойкость полученных покрытий увеличилась в 2 раза. Концентрация (в расчёте на чистый ДНА) – от 1 до 5 г/л в электролите.

Ключевые слова: хромирование, детонационные наноалмазы, тетрил, композиционный алмазосодержащий состав, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения.

Хромирование является важнейшим процессом электрохимического нанесения функциональных покрытий и находит широкое применение в различных областях промышленности, например, в машиностроении, станкостроении, инструментальной промышленности.

Ранее показано, что включение наноалмазных частиц (ДНА-ТАН), модифицированных аммиаком при высоких температурах и давлении [1] и алмазосодержащей шихты АШ, в хромовое покрытие [2–4] приводит к существенному увеличению микротвердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Характер влияния добавок на скорость и механизм процессов, протекающих при осаждении хрома, равно как и на свойства покрытий,

неоднозначен и определяется рядом факторов: концентрацией, типом и модификацией добавки, параметрами электролиза [3–6].

У известных способов применения ДНА есть существенный недостаток – использование водных суспензий с концентрацией ~5% мас. Это приводит к необходимости транспортировки совместно с ДНА ~95% мас. воды, что экономически затратно; суспензия ДНА занимает значительные площади при хранении; суспензию необходимо оберегать от замерзания в холодное время года (при замерзании ДНА необратимо коагулируются). Кроме того, технологически в гальванические ванны удобнее вносить точно определяемые по весу сухие порошки ДНА. Использование обычных сухих порошков ДНА для электрохимических покрытий на настоящий момент невозможно из-за их сильной агрегации.

Цель работы – разработка и доказательное применение порошкообразного алмазосодержащего состава (ДНА получен подрывом зарядов из тетрила), способного заменить водную суспензию ДНА в процессе электрохимического хромирования при сохранении достигнутых показателей качества или их улучшении.

Экспериментальная часть

Для данной работы использовали следующий электролит и режимы нанесения покрытия: CrO_3 – 250 г/л; H_2SO_4 – 2,5 г/л; $t = 45^\circ\text{C}$, $i = 50\text{--}70$ А/дм² (режим твердого хромирования); $t=60^\circ\text{C}$, $i=25\text{--}40$ А/дм² (режим износостойкого хромирования).

Выбор такого электролита объясняется тем, что он более стабилен по составу, чем разбавленный электролит хромирования, но при этом обладает лучшей рассеивающей и кроющей способностью, чем более концентрированный электролит.

Предварительно готовили композицию, содержащую ДНА. Для этого в суспензию, содержащую ДНА-ТАН (ДНА получен подрывом тетрила и обработан аммиаком в водной среде при 230°C в течение 1 ч), добавляли NH_4NO_3 (на 1 г ДНА – 3 г NH_4NO_3), полученный раствор-суспензию сушили при 105°C до полного удаления воды, затем нагревали до 215°C и выдерживали 2 часа. При этом идёт разложение NH_4NO_3 до смеси оксидов азота, последние взаимодействуют с поверхностью ДНА, увеличивая количество кислородсодержащих функциональных групп на поверхности, и, как следствие, гидрофильность наноалмазов. Кроме того, ослабляются связи между частицами наноалмаза в агрегатах в результате воздействия высокой температуры и окислительных газообразных агентов.

Затем сухой порошок заливали водой (на 1 г смеси – 80 мл H_2O) и отмывали от следов NH_4NO_3 . После декантации во влажный осадок добавляли кислый карбонат натрия (на 1 г ДНА – 0,3 г NaHCO_3), смесь тщательно перемешивали и сушили при 105°C до постоянного веса (массы). В полученный сухой порошок добавляли лимонную кислоту (ЛК) (на 1 г ДНА – 0,2 г ЛК) и тщательно растирали в ступке.

1 г МДНА (модифицированного ДНА) находится в 1,6 г смеси. При внесении в воду происходит бурное газовыделение и практически полное «растворение» ДНА, образуется однородная устойчивая суспензия ДНА в воде, которую и добавляли к хромовому электролиту.

Использовали следующие методики определения качества покрытия и свойств электролита: определение микротвёрдости [7], измерение износостойкости [8], снятие поляризационных кривых [9], определение коэффициента трения покрытий [10].

Обсуждение результатов

Исследовалось два режима хромирования: твердое ($i = 50, 60, 65, 70$ А/дм² и $t = 45^\circ\text{C}$) и износостойкое ($i=25, 30, 35, 40$ А/дм² и $t = 60^\circ\text{C}$). Каждый опыт проводится два раза для проверки воспроизводимости. Добавка МДНА вводилась в хромовый электролит в следующих концентрациях: 0,1; 0,2; 0,5; 1,5 г/л.

Полученные экспериментальные данные по выходу хрома по току показывают, что ввод добавки МДНА значительно увеличивает выход по току как в случае износостойкого хромирования (на 4–7 %), так и в случае осаждения твёрдых хромовых покрытий (на 5–6 %). Помимо этого, наблюдается рост выхода по току с увеличением плотности тока, что является характерным и для чистого хромового электролита.

Для изучения кинетики выделения хрома были сняты катодные поляризационные кривые, которые показали, что в условиях осаждения износостойкого хрома ($t=60^{\circ}\text{C}$, $i=25-40$ А/дм²) происходит сдвиг потенциала (около 300 мВ) в область положительных значений относительно значения, полученного в чистом электролите. Таким образом, уменьшается перенапряжение выделения хрома, вероятно, за счет адсорбции добавки МДНА на поверхности. Увеличение концентрации добавки от 0,2 г/л до 5 г/л дает смещение потенциала в область отрицательных значений (примерно на 30 мВ), что указывает на небольшое затруднение выделения хрома.

В условиях осаждения твердого хрома ($t = 45^{\circ}\text{C}$, $i = 50-70$ А/дм²) также происходит сдвиг потенциала (около 300 мВ) в область положительных значений относительно значения, полученного в чистом электролите. Таким образом, уменьшается перенапряжение выделения хрома, вероятно, за счет адсорбции добавки МДНА на поверхности катода. С увеличением концентрации добавки от 0,2 г/л до 5 г/л тенденции смещения потенциала не наблюдается. Таким образом, изменение концентрации добавки МДНА не влияет на процесс выделения хрома.

При введении МДНА в электролит в количестве 1% содержание наноалмазов в покрытии составляет 0,2 % мас. Полученные экспериментальные данные по микротвердости приведены на рисунках 1, 2.

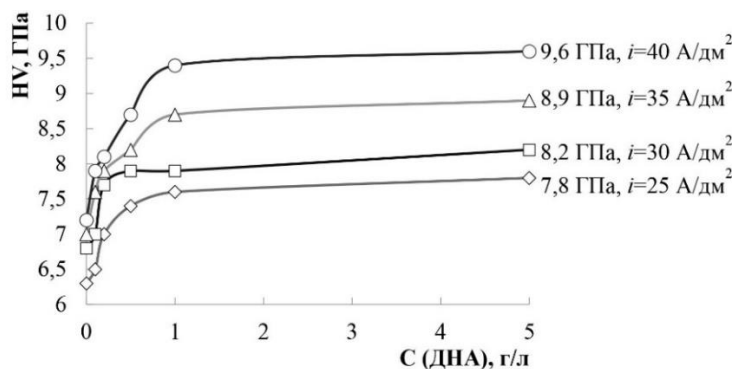


Рис. 1. Зависимость микротвёрдости от концентрации добавки МДНА при различных плотностях тока для износостойкого хрома

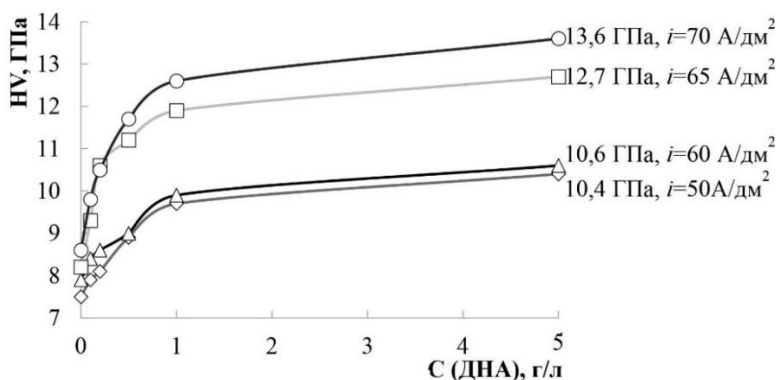


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости от концентрации добавки МДНА при различных плотностях тока для твердого хрома

При добавлении наноалмазной добавки МДНА микротвердость хромовых покрытий увеличивается значительно – в 1,3 раза в режиме износостойкого хромирования и в 1,6 раза в режиме твёрдого хромирования по сравнению со значениями микротвердости, полученными в чистом электролите (рисунки 1, 2). При этом микротвердость увеличивается как при увеличении плотности тока, так и при увеличении концентрации наноалмазной добавки. При увеличении содержания наноалмазной добавки свыше 1 г/л в электролите хромирования значения микротвердости достигают максимума и выходят практически на плато.

Влияние наноалмазной добавки на износостойкость хромовых покрытий показаны в таблице.

Износостойкость покрытия с добавкой МДНА, % истершейся массы покрытия за 20 часов

Катодная плотность тока $i_k, \text{А/дм}^2$		С (МДНА), г/л		
		0	0,2	1
35		2,4	1,9	1,5
40		1,5	1,3	0,8

Износостойкость измерялась только для хромовых покрытий, полученных в режиме износостойкого хромирования. Она резко увеличивается (в ~2 раза) в сравнении с износостойкостью покрытий, полученных из чистого хромового электролита. При этом заметно, что увеличение износостойкости происходит как за счет увеличения плотности тока, так и за счет увеличения концентрации МДНА. Наилучшие результаты были достигнуты для хромовых покрытий, полученных при $i = 40 \text{ А/дм}^2$ и с добавкой МДНА с концентрацией 1 г/л.

Для исследования коэффициента трения скольжения было получено хромовое покрытие с добавкой МДНА с концентрацией 1 г/л в электролите, при температуре 60°C и плотности тока $i = 35 \text{ А/дм}^2$ (износостойкое хромирование). Для сопоставления результатов исследовалось чистое хромовое покрытие, полученное при таких же условиях. Полученные результаты были сведены в график, представленный на рис. 3.

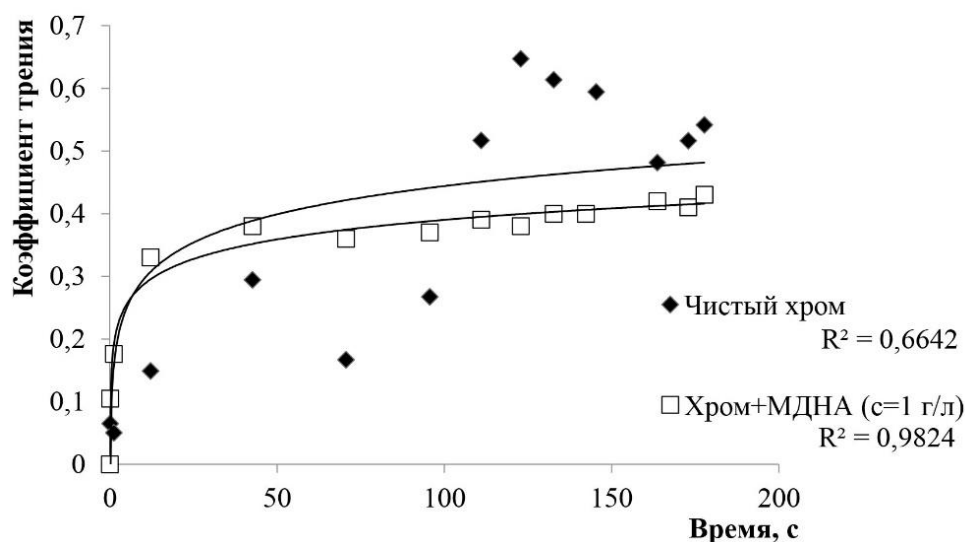


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения чистого хромового покрытия и с наноалмазной добавкой МДНА ($C=1 \text{ г/л}$) от времени

Как видно из рис. 3, для чистого хромового покрытия коэффициент трения в процессе эксперимента менялся достаточно хаотично – от 0,15 до 0,7, что может говорить о трудной предсказуемости изменения трения в процессе работы пар сопряжения. Согласно теоретическим данным, коэффициент трения в начале эксперимента совпадает с коэффициентом трения чистого хрома, а к концу эксперимента значение коэффициента трения находится между значениями для чистого хрома и стали. Следовательно, в процессе истирания происходит износ хромового покрытия до стальной подложки.

Износ образца, покрытого чистым хромом, происходит очень неравномерно, с задиrom, чего не наблюдается при износе покрытия, полученного при добавлении наноалмазной добавки МДНА, то есть, процесс износа в данном случае прогнозируем.

По результатам данного эксперимента, условия которого приближены к работе реальной пары трения, можно сделать вывод, что износостойкость покрытия, полученного с добавлением наноалмазной добавки, в разы выше образца, покрытого чистым хромом.

Согласно работе [11], детонационные наноалмазы, полученные из тетрила, тротил-гексогеновых смесей и тройного состава – смесь тетрила, тротила и гексогена – идентичны, что позволяет с успехом использовать, по сути, любые ДНА для разработанной технологии хромирования.

Выводы

1. Разработан порошкообразный композиционный алмазосодержащий состав, включающий в себя детонационный наноалмаз, полученный подрывом заряда из тетрила, слабый щелочной (NaHCO_3) и кислотный (лимонная кислота) агенты. Состав удобен при транспортировке, хранении и применении, экологически безопасен. Содержание МДНА в ДНА составляет 62,5 % мас.

2. При введении МДНА в электролит микротвердость значительно увеличивается - в $\sim 1,5$ раза. Наибольшие значения микротвердости хромовых покрытий (13,3 ГПа) наблюдаются при осаждении из электролита с использованием МДНА $C = 5$ г/л, $i = 70$ А/дм², $t = 45^\circ\text{C}$.

3. Износостойкость хромовых покрытий увеличивается при вводе МДНА в 2 раза. Наилучшие значения износостойкости хромовых покрытий наблюдаются в электролите в режиме износостойкого хромирования $t = 60^\circ\text{C}$, $i = 40$ А/дм² и с концентрацией добавки 1 г/л. При этом износ чистого хромового покрытия идет с задиrom, а покрытия с наноалмазами – без задира, наноалмазная добавка МДНА проявляет свойства противозадирной присадки.

4. В результате исследований можно рекомендовать для использования стандартный электролит хромирования состава: CrO_3 – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л.

5. Перспективным в дальнейших исследованиях можно считать разработку технологии получения сухих ДНА без добавок, легко, без какого-либо воздействия дающих устойчивые суспензии наноалмазов в электролитах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–29–19112.

**В.Ю. Долматов¹, Г.К. Буркат², К.А. Свір², В.А. Марчуков¹, А.О. Дорохов³, А.Веханен⁴,
В. Мюлльмакі⁴, А.С.Козлов¹, Н.С. Алмазова¹**

¹Федеральне державне унітарне підприємство «Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро
«Технолог», м. Санкт-Петербург, Росія

²Санкт-Петербурзький Державний технологічний інститут (Технічний університет), м. Санкт-
Петербург, Росія,

³АТ «Завод "Пластмасс", м. Копейськ, Челябінська обл., Росія

⁴«Carbodeon Ltd. Oy», Фінляндія

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОСАДЖЕННЯ ХРОМУ В ПРИСУТНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО АЛМАЗОВІСНОГО СКЛАДУ

Мета дослідження полягає у розробці способу отримання якісного електрохімічного хромового покриття з використанням нового виду алмазовмісної добавки, що має суттєві переваги над традиційно використовуваними детонаційними наноалмазами (ДНА) у вигляді водних суспензій. Як добавку розробили і використали порошкоподібну композиційну алмазовмісну суміш, що містить детонаційний наноалмаз (ДНА), отриманий підривом зарядів з тетрилу, лужний (NaHCO_3) і кислотний (лимонна кислота) агенти. Суміш містить 62,5 % мас. ДНА. Використали стандартний електроліт хромування: CrO_3 – 250 г/л, H_2SO_4 – 2,5 г/л, ДНА – від 0,1 до 5 г/л, традиційні методології та алгоритм проведення експерименту. Рамки дослідження обмежуються створенням і застосуванням конкретної, зручної в роботі та приготуванні суміші з ДНА. Модифікований ДНА (МДНА) можна додавати в стандартний електроліт хромування безпосередньо або у вигляді свіжоприготованої водної суспензії, він екологічно безпечний. Досягнуто суттєве збільшення виходу хрому по струму на ~ 5%.

Оригінальність роботи полягає в поєднанні в алмазовмісній суміші «інертного» наноалмазу і активних лужного та кислого компонентів, що спрацьовують тільки при внесенні у водне середовище і забезпечують необхідну дезагрегацію та стійкість суспензій ДНА. Досягнуто збільшення мікротвердості зносостійкого хромового покриття в 1,3 рази (до 9,6 ГПа) і твердого хромового покриття в 1,6 рази (до 13,6 ГПа). Зносостійкість отриманих покриттів збільшилася в 2 рази. Концентрація (у розрахунку на чистий ДНА) – з 1 до 5 г/л в електроліті.

Ключові слова: хромування, детонаційні наноалмази, тетрил, композиційна алмазовмісна суміш, мікротвердість, зносостійкість, коефіцієнт тертя.

**V.Yu. Dolmatov¹, G.K. Burkat², K.A. Svir², V.A. Marchukov¹, A.O. Dorokhov³, A. Vehanen⁴,
V. Myllymaki⁴, A.S. Kozlov¹, N.S. Almazova¹**

¹Federal State Unitary Enterprise "Special Design and Technology Bureau "Technolog", Russia

²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Russia

³JSC "Plastmass" Plant", Russia

⁴«Carbodeon Ltd. Oy», Finland

STUDY OF ELECTROCHEMICAL DEPOSITION PROCESS OF CHROMIUM IN THE PRESENCE OF COMPOSITE DIAMOND-CONTAINING COMPOUND

The purpose of the study is to develop a method for producing a high-quality electrochemical chromium coating using a new type of diamond-containing additive, which has significant advantages over traditionally used detonation nanodiamonds (DNDs) in the form of aqueous suspensions. As an additive, a powdered composite diamond-containing compound was developed and used, consisting of detonation nanodiamond (DND), obtained by detonating of tetryl charges, alkaline agent (NaHCO_3) and acid agent (citric acid). The composition contains 62,5 wt.% of DND. A standard chromium electrolyte was used: CrO_3 – 250 g/l, H_2SO_4 – 2.5 g/l, DND – 0.1 to 5 g/l, traditional methodologies and the algorithm of the experiment was applied.

The scope of the study is limited to the creation and application of a specific, easy-to-use and prepare DND composition. Modified DND (MDND) can be added to the standard chromium electrolyte directly or in

the form of a freshly prepared aqueous suspension, it is environmentally friendly. A significant increase in the current yield of chromium by ~ 5% was achieved.

The originality of the work lies in combining in the diamond-containing composition the “inert” nanodiamond and active alkaline and acid components, which work only when introduced into the aquatic environment and provide the necessary disaggregation and stability of DND suspensions. An increase in microhardness of wear-resistant chromium coating by 1.3 times (up to 9.6 GPa) and hard chromium coating by 1.6 times (up to 13.6 GPa) were achieved. The wear resistance of the resulting coatings increased by 2 times. Concentration (based on pure DND) increased from 1 to 5 g/l in the electrolyte.

Key words: chromium plating, detonation nanodiamonds, tetryl, composite diamond-containing compound, microhardness, wear resistance, friction coefficient.

Литература

1. Патент РФ № 2384524 МПКСО1В 31/06. Способ получения стабильной суспензии детонационных наноалмазов / В.Ю. Долматов, В.А. Марчуков, В.Г. Сущев, М.В. Веретенникова. – Оpubл. 20.03.2010, Бюл. № 8.
2. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение. свойства. применение. – СПб: НПО «Профессионал», 2011. – 536 с.
3. Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Осава Е., Орлова Е.А. Исследование свойств хром-алмазных покрытий на основе детонационных наноалмазов различных производителей // Сверхтвёрдые материалы. – 2010. – № 2. – С. 43–59.
4. Ващенко С.В., Соловьева З.А. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – Т. 1, № 5-6. – С. 45–48.
5. Долматов В.Ю., Фуджимура Т., Буркат Г.К., Орлова Е.А., Веретенникова М.В. Получение износостойких хромовых покрытий с применением наноалмазов различной природы // Порошковая металлургия. – 2003. – № 42. – С. 587–591.
6. Тихонов К.И., Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Орлова Е.А. Использование алмазной шихты в процессе хромирования // Журнал прикладной химии. – 2007. – № 7. – С. 1112–1116.
7. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 35 с.
8. Ковенский И. М., Поветкин В. В. Испытания гальванических покрытий: справ. изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 136 с.
9. Орлова Е.А., Александрова Г.С., Шошина И.А., Нараев В.Н. Применение компьютерной техники для снятия поляризационных кривых: метод. указания. – СПб: СПб ГТИ (ТУ), 2009. – 18 с.
10. Крагельский И.В. Коэффициенты трения: справ. пособие. – М.: МАШГИЗ, 1962. – 217 с.
11. Panich A.M., Shames A.I., Mogilyansky D., Goren S. D., Dolmatov V.Yu. Detonation nanodiamonds fabricated from tetryl: Synthesis, NMR, EPR and XRD study // *Diamond & Related Materials*. – 2020. – Vol. 108. – 107918.

Поступила 27.04.20

References

1. Dolmatov, V. Yu., Marchukov, V. A., Sushev, V. G. & Veretennikova, M. V. (2010). Patent of the Russian Federation 2384524 [in Russian].
2. Dolmatov, V. Yu. (2011). Detonatsionnye nanoalmazy. Poluchenie. Svoistva. Primenenie. [*Detonation nanodiamonds. Obtaining. Properties. Application.*]. St. Petersburg: NPO «Professional» [in Russian].
3. Burkat, G. K., Dolmatov, V. Yu., Osawa, E. & Orlova, E. A. (2010). Issledovanie svoisty khrom-almaznykh pokrytii na osnove detonatsionnykh nanoalmazov razlichnykh

- proizvoditelei [Study of the properties of chromium-diamond coatings based on detonation nanodiamonds of various manufacturers]. *Sverkhтвердые материалы – J. Superhardmater.*, 2. 43–59 [in Russian].
4. Vashchenko, S.V., Solovieva, Z. A. (1992). Elektroosazhdenie iznosostoikikh khromovykh pokrytii iz elektrolitov s ultradispersnymialmaznymi poroshkami. [Electrodeposition of wear-resistant chromium coatings from electrolytes with ultrafine diamond powders]. *Galvanotekhnika I obrabotka poverkhnosti – Electroplating and surface treatment, Vol.1*, 5–6, 45–48 [in Russian].
 5. Dolmatov, V. Yu., Fujimura, T., Burkat, G. K., Orlova, E. A. & Veretennikova, M. V. (2003). Poluchenie iznosostoikikh khromovykh pokrytii s primeneniem nanoalmazov razlichnoi prirody [Obtaining wear-resistant chromium coatings using nanodiamonds of various genesis]. *Poroshkovaia metallurgiiia – Powder metallurgy*, 42, 587–591 [in Russian].
 6. Tikhonov, K. I., Burkat, G. K., Dolmatov, V. Yu. & Orlova, E. A. (2007). Ispolzovaniealmaznoi shikhty v protsesse khromirovaniia [The use of diamond blendin the process of chromium plating]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Journal of Applied Chemistry*, 7, 1112–1116 [in Russian].
 7. Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniemalmaznykh nakonechnikov [Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. (1993). GOST 9450-76. Moscow: Izdatelstvo standartov [in Russian].
 8. Kovenskii, I. M., Povetkin, V. V. (2001). *Ispytaniia galvanicheskikh pokrytii: sprav. izd. [Tests of electroplated coatings: Ref. ed]*. Moscow: Internet Engineering [in Russian].
 9. Orlova, E.A., Alexandrova, G. S., Shoshina, I. A. & Naraev, V. N. (2009). Primenenie kompiuternoi tekhniki dlia snyatiia poliarizatsionnykh krivykh: metod. Ukazaniia [The use of computer technology for taking polarization curves: guidelines]. St. Petersburg: SPbGTI (TU) [in Russian].
 10. Kragelskii, I.V. (1962). *Koeffitsienty treniia: sprav. posobie [The coefficients of friction: handbook]*. Moscow: MASHGIZ.
 11. Panich A. M., Shames A. I., Mogilyansky D., Goren S. D., Dolmatov V. Yu. (2020). Detonation nanodiamonds fabricated from tetryl: Synthesis, NMR, EPR and XRD study. *Diamond & Related Materials, Vol. 108*, 107918.

УДК 621.921.343

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-194-203

Д.А. Стратійчук, канд. техн. наук, **В. З. Туркевич**, академік НАН України,
К. В. Сліпченко, Ю.О. Мельнійчук, Д.В. Туркевич, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, 04074 м. Київ, вул.
Автозаводська, 2; E-mail:*

СПІКАННЯ, ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ДТА-ТГ АНАЛІЗ КАРБІДОВМІСНИХ КОМПОЗИТІВ, ОТРИМАНИХ В СИСТЕМАХ cBN-MeC_x-(Al), де Me – Ti, Zr, V, Cr, Ta

За умов високих тисків та температур для систем cBN-MeC_x-(Al), де Me – Ti, Zr, V, Cr, Ta, досліджено процеси фазоутворення, деякі фізико-технічні та термічні характеристики отриманих надтвердих керамоматричних композитів. Методами ДТА-ТГ аналізу на повітрі в температурному інтервалі 200-1300 °С проаналізовано процеси термохімічної деструкції спечених cBN-карбідних матеріалів. Експериментальним шляхом встановлено, що помітні процеси окиснення для всіх надтвердих композитів розпочинаються при $T > 800^{\circ}\text{C}$, супроводжуються екзотермічними ефектами та, зазвичай, набором загальної маси зразка. Окиснення проходить в 2 етапи, починаючи із взаємодії